

УДК 621.313:536.2.24:539.2

В.Ф. Болюх, А.М. Марков, В.Ф. Лучук, М.А. Рассоха, И.С. Щукін

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УДАРНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИНДУКЦИОННОГО ТИПА С РАЗЛИЧНЫМИ ИНДУКТОРАМИ

*Експериментально і теоретично досліджені шість різних індукторів ударного електро механічного перетворювача індукційного типу, який збуджується від полярного ємнісного накопичувача. Визначені закономірності впливу основних параметрів індуктора на електричні, механічні та теплові показники при різних режимах роботи перетворювача. На основі запропонованих критеріїв виконана оцінка ефективності індуктора та запропоновані практичні рекомендації. Отримано задовільну відповідність між розрахунковими та вимірними параметрами.*

*Експериментально и теоретически исследованы шесть различных индукторов ударного электро механического преобразователя индукционного типа, возбуждаемого от полярного емкостного накопителя. Установлены закономерности влияния основных параметров индуктора на электрические, механические и тепловые показатели при различных режимах работы преобразователя. На основе предложенных критериев выполнена оценка эффективности индуктора и предложены практические рекомендации. Получено удовлетворительное соответствие между расчетными и измеренными параметрами.*

### ВВЕДЕНИЕ

Ударные электро механические преобразователи индукционного типа (УЭПИ) широко применяются для создания мощных силовых импульсов, воздействующих на различные материальные объекты во многих отраслях промышленности и науки [1-3]. В этих преобразователях при импульсном возбуждении неподвижного индуктора от емкостного накопителя в близко расположенном электропроводящем якоре индуцируется ток, взаимодействие которого с магнитным полем индуктора создает электродинамическую силу, отталкивающую якорь от индуктора.

Однако такие преобразователи характеризуются относительно низкой эффективностью преобразования электрической энергии в механическую [4, 5]. Одним из ключевых элементов УЭПИ является индуктор, во многом определяющий его конструкцию, конфигурацию, скоростные и силовые показатели якоря, величину и скорость нарастания тока возбуждения, тепловые режимы и массо-габаритные показатели.

Индуктор характеризуется целым рядом как конструктивных (табл. 1), так и технологических параметров (степень чистоты и состояния медного провода, материал, условия и плотность пропитки, качество укладки и изгибов провода, параметры и состояние изоляции и др.).

Математические модели УЭПИ, как правило, представляют индуктор в идеализированном виде. Поэтому особый интерес представляют экспериментальные исследования УЭПИ с различными индукторами, что позволяет реально установить основные закономерности и оценить степень адекватности математических моделей.

Актуальность задачи состоит в том, что до настоящего времени комплексные экспериментально-теоретические исследования УЭПИ с различными индукторами не проводились.

Целью статьи является выявление закономерностей влияния параметров индукторов на основные электрические, механические и температурные показатели УЭПИ дисковой конфигурации.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 1 представлены схема и общий вид экспериментальной установки, в которой установлен индуктор №1 (см. табл. 1). Установка содержит неподвижный индуктор 1, который прикреплен к неметаллической (гетинаксовой) пластине 4 и возбуждается аperiodическим импульсом при подключении к емкостному накопителю. К массивному медному якору 2 прямоугольной формы присоединена ударная стальная пластина 3, которая воздействует на боек 8, совершающий удары по верхней упорной пластине 5. Стальная пластина 3 выполнена с отогнутыми вверх направляющими ребрами. Гетинаксовая пластина 4 с УЭПИ крепится между двумя массивными стальными плитами 5 с помощью опорных штырей 6 бойком вверх. Пружина 7 обеспечивает заданную силу противодействия движению и осуществляет возврат якоря 2 с ударной пластиной 3 в исходное положение до тесного контакта с индуктором по окончании рабочего цикла при любом пространственном положении преобразователя.

При разряде емкостного накопителя в индукторе протекает импульс тока  $i_1$ , который наводит ток  $i_2$  в якоре, что приводит к возникновению между ними электродинамической силы

$$f_z(t, z) = i_1(t)i_2(t) \frac{dM_{12}}{dz}(z), \quad (1)$$

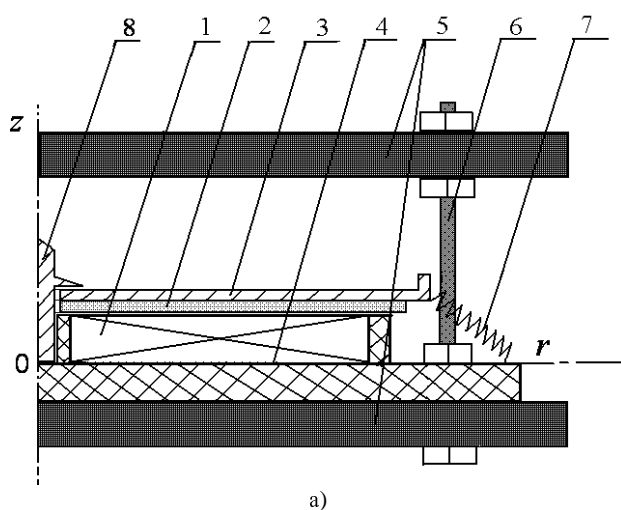
где  $M_{12}$  – взаимдуктивность индуктора и якоря, зависящая от перемещения якоря относительно индуктора вдоль оси  $z$ .

С учетом противодействующих сил упругости пружины  $f_{pr}$ , силы тяжести  $f_g$  и аэродинамического сопротивления  $f_a$  на вертикально перемещаемый якорь действует результирующая сила:

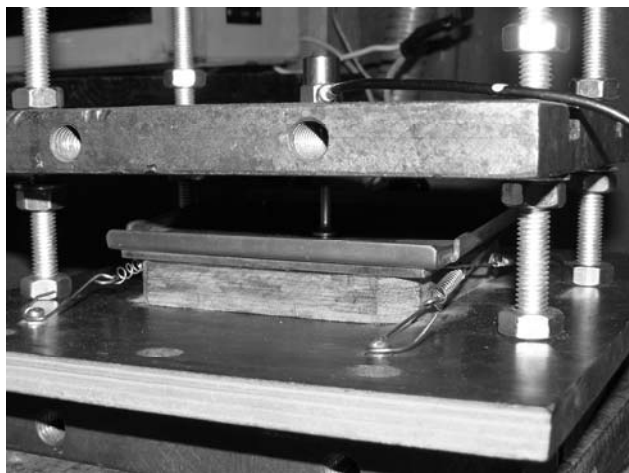
$$\begin{aligned} f_{rez}(t, z) &= f_z(t, z) - f_{pr}(z) - f_g - f_a(V) = \\ &= i_1(t)i_2(t) \frac{dM_{12}}{dz}(z) - K_p \cdot \Delta Z(t) - g \sum_k m_k - \\ &\quad - 0,125 \cdot \pi \cdot \gamma_a \beta_a D_{ex2}^2 V^2(t), \end{aligned} \quad (2)$$

Основные параметры индукторов

Параметр	Номер индуктора					
	№1	№2	№3	№4	№5	№6
Внешний диаметр индуктора $D_{ex1}$ , мм	120	120	100	110	100	110
Внутренний диаметр индуктора $D_{in1}$ , мм	10	10	10	10	10	10
Высота индуктора $H_1$ (меди), мм	7	15	10	13	10	26
Сечения витка (шины) $S = a \times b$ , мм <sup>2</sup>	2×7	2×7	1,8×4,8	3×13	1,8×4,8	3×13
Количество витков индуктора $N_1$ , шт	13	27	42	11	42	20
Число рядов обмотки $J$ , шт	1	2	2	1	2	2
Масса меди в индукторе $m_0$ , кг	0,31	0,69	0,61	0,71	0,61	1,26
Активное сопротивление $R_1$ , мОм	3,3	6,9	16,1	0,9	16,1	1,6
Индуктивность $L_1$ , мкГн	7,9	30,8	79,3	4,66	85,4	12,4
Постоянная времени $\tau = L_1 / R_1$ , мс	2,39	4,46	4,93	5,18	5,30	7,75
Степень пропитки связующим	точечная	точечная	полная	точечная	полная	точечная
Корпус	-	-	пластик	-	сталь	-
Полная масса индуктора $m_{ind}$ , кг	0,33	0,73	0,75	0,74	1,68	1,31



а)



б)

Рис. 1. Схема (а) и общий вид (б) экспериментальной установки

где  $K_p$  – коэффициент упругости пружины;  $\Delta Z(t)$  – величина перемещения якоря;  $g$  – ускорение свободного падения;  $m_k$  – масса  $k$ -го ускоряемого элемента;  $\gamma_a$  – плотность воздуха;  $\beta_a$  – коэффициент аэродинамического сопротивления;  $V$  – скорость якоря;  $D_{ex2}$  – эффективный размер ударной пластины.

Импульс силы  $FI$ , действующий на якорь, определяется значением интеграла:

$$FI = \int_0^t f_{rez}(t, z) dt. \quad (3)$$

К верхней массивной стальной плите 5, которая ограничивает движение бойка, сверху подсоединен пьезоэлектрический виброизмерительный преобразователь ДН-4-М1 (рис. 1, б). Он осуществляет преобразование механических колебаний, возникающих при ударе бойка о верхнюю стальную плиту, в электрические сигналы, передавая их в измеритель шума и вибрации ВШВ-003. Последний преобразует электрические сигналы в величины виброускорения  $a_f$  и виброскорости  $v_f$ . Кроме того, при помощи измерительного шунта осуществляется регистрации тока в индукторе. Таким образом, экспериментальная установка позволяет измерять ток в индукторе и вибрацию верхней стальной плиты при помощи электронного осциллографа RIGOL DS 522M.

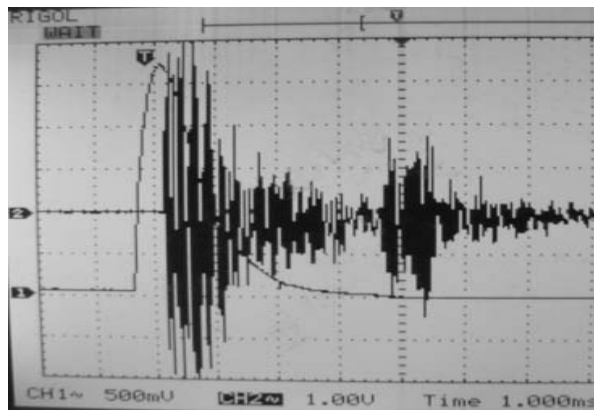
При экспериментальных исследованиях использовались электролитические конденсаторы  $HJ$  (*snap-in terminal type, miniaturized series*) с предельным напряжением  $U_0 = 450$  В и емкостями  $C = 150$  и  $330$  мкФ. Конденсаторы комплектовались в батареи общей емкостью  $C = 6 \times 330 = 1980$  мкФ;  $C = 19 \times 150 = 2850$  мкФ;  $C = 6 \times 330 + 19 \times 150 = 4830$  мкФ и  $C = 20 \times 330 = 6600$  мкФ (рис. 2).

Рис. 2. Общий вид емкостного накопителя ( $C = 20 \times 330 = 6600$  мкФ) с токовым шунтом

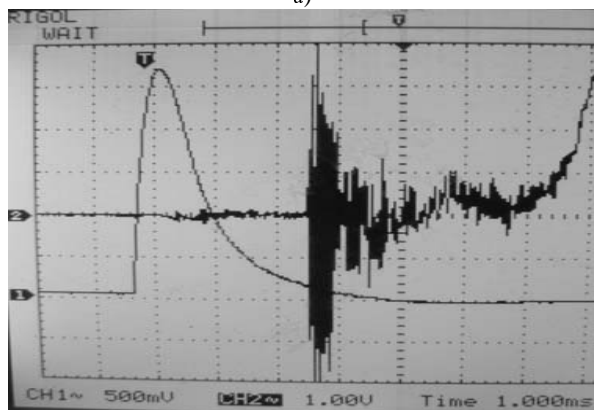
Поскольку емкостной накопитель комплектовался электролитическими конденсаторами, в системе

возбуждения индуктора электронным образом формировался аperiodический импульс тока [6].

На рис. 3 представлены осциллограммы тока в индукторе  $i_l$  и виброускорения  $a_f$ , а на рис. 4 – тока  $i_l$  и виброскорости  $v_f$  при использовании емкостного накопителя  $C = 4000$  мкФ,  $U_0 = 300$  В и различных расстояниях от бойка до упора  $Z_{end}$  (индуктор №3).



а)



б)

Рис. 3. Осциллограммы тока в индукторе (канал CH1) и виброускорения (канал CH2) при:  
а)  $Z_{end} = 0$  мм; б)  $Z_{end} = 10$  мм

При заданном расстоянии до пластины  $Z_{end}$  можно вычислить среднюю скорость якоря на участке движения:

$$V_{cp} = \frac{Z_{end}}{t_{зап} - t_{зап0}}. \quad (4)$$

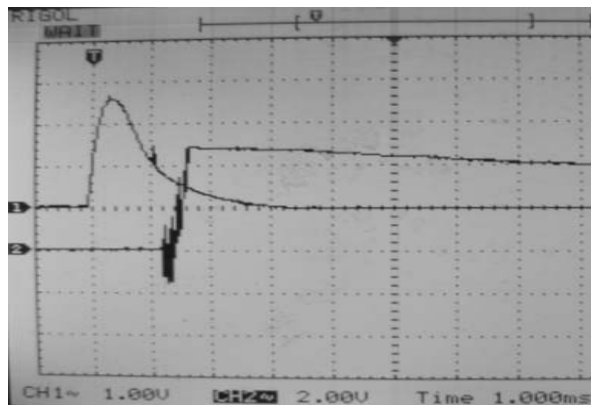
Таким, образом, зная характеристики измерительного шунта, прибора ВШВ-003 и шкалы осциллографа при экспериментальных исследованиях определяются:

- форма и амплитудное значение тока индуктора  $i_{lm}$ ;
- амплитудные значения виброускорения  $a_{fm}$  и виброскорости  $v_{fm}$ ;
- время достижения током максимального значения – (длительность фронта импульса)  $t_{фр}$ ;
- полная длительность токового импульса  $t_{имп}$ ;
- время запаздывания между началом вибрационных и электрических процессов  $t_{зап}$ ;
- средняя скорость якоря  $V_{cp}$  с разгоняемыми элементами.

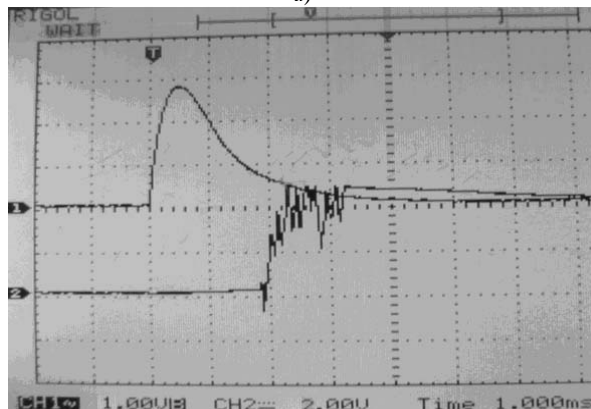
Экспериментально определенные параметры сравнивались с рассчитанными теоретически по известной математической модели [7].

Как видно, начало вибраций возникает в пластине с некоторым запаздыванием  $t_{зап0}$  по отношению к началу тока в индукторе, даже если ход якоря равен нулю.

При увеличении хода якоря возрастает и интервал запаздывания  $t_{зап}$ , так как якорю требуется некоторое время, чтобы, разогнавшись, достигнуть верхней упорной пластины.



а)



б)

Рис. 4. Осциллограммы тока в индукторе (канал CH1) и виброскорости (канал CH2) при:  
а)  $Z_{end} = 2,5$  мм; б)  $Z_{end} = 5,0$  мм

#### ПАРАМЕТРЫ ИССЛЕДУЕМЫХ ИНДУКТОРОВ

Испытывались шесть различных индукторов, обозначенных номерами №1 – №6 (рис. 5). Их основные параметры приведены в табл. 1.

Большому порядковому номеру индуктора соответствует большее значение параметра  $\tau = L_1 / R_1$ , где  $L_1$  – индуктивность индуктора,  $R_1$  – его сопротивление.

Все индукторы имеют дисковую форму и намотаны медной шиной с различной плотностью укладки. Для индукторов №1, №2, №4, №6 (рис. 5а,б,г,е) использована точечная (не полная) пропитка витков связующим эпоксидным материалом. При этом улучшается отвод тепла от обмотки, но ухудшаются механические и конструктивные свойства индуктора.

Индукторы №3 и №5 (рис. 5в,д) полностью пропитаны связующим материалом и размещены в корпусе, охватывающем обмотку с наружной боковой и нерабочей (необращенной к якорю) торцевой сторон. Эти индукторы имеют одинаковую обмотку, но различный корпус: изоляционный (стеклотекстолитовый) и ферромагнитный (стальной).

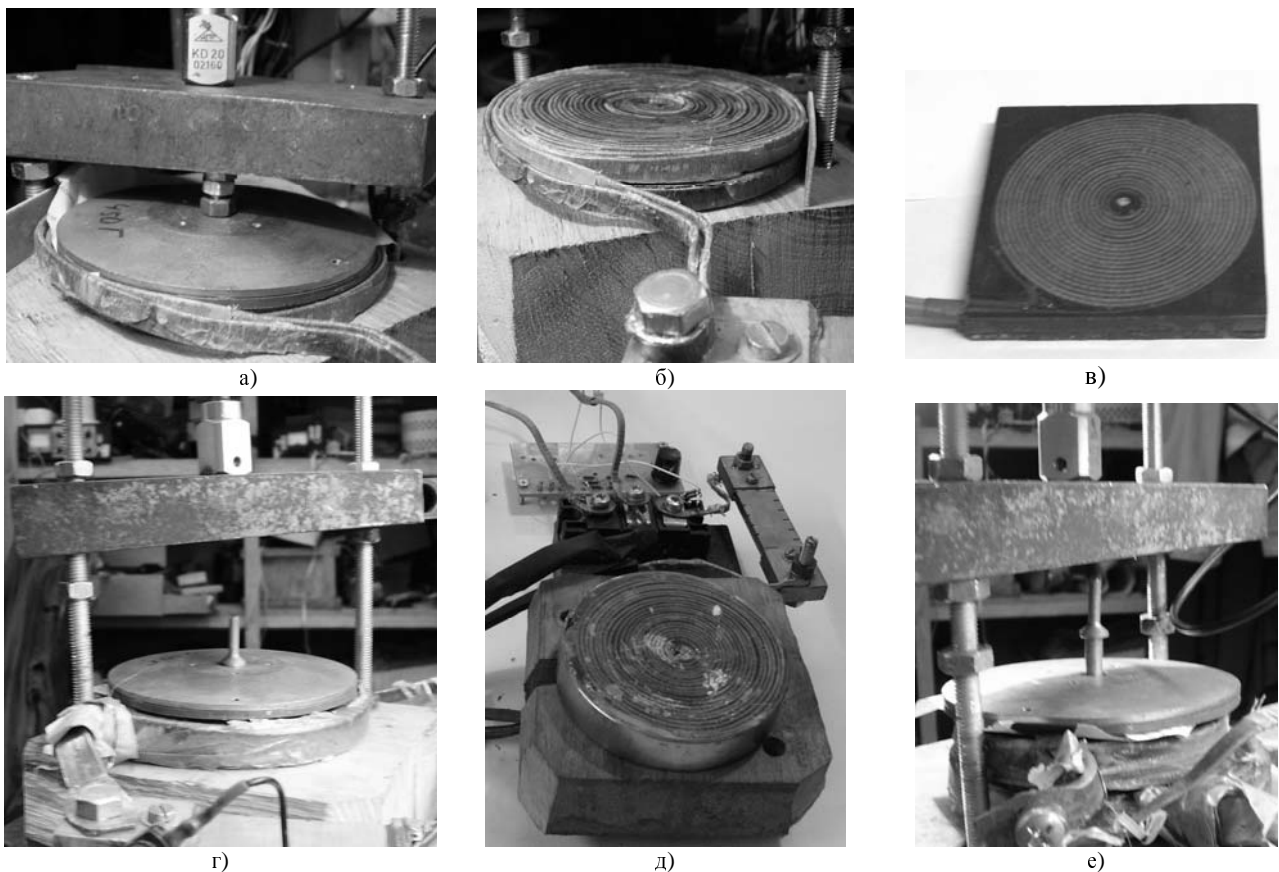


Рис. 5. Общий вид индуктора: а) №1; б) №2; в) №3; г) №4; д) №5; е) №6

#### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УЭПИ С РАЗЛИЧНЫМИ ИНДУКТОРАМИ

В проведенных экспериментах использовался якорь и скрепленная с ним стальная пластина круглой формы (рис. 5а,г,е). При этом индуктор крепился к массивному деревянному основанию.

Рассмотрим средние скорости  $V_{cp}$  (4), приобретаемые якорем при возбуждении индукторов УЭПИ от батареи конденсаторов емкостью  $C = 2850$  мкФ, заряженной до напряжения  $U_0 = 400$  В. Скорость якоря возрастает только на ограниченном расстоянии от индуктора (приблизительно до 10 мм), где осуществляется эффективное электродинамическое взаимодействие с индуктором. В последующем с увеличением расстояния от индуктора скорость якоря практически не растет и начинает снижаться из-за противодействующих сил. Отметим, что в целом экспериментальные данные (рис. 6а) удовлетворительно согласуются с расчетными (рис. 6б), что позволяет судить об их адекватности.

На рис. 7 представлены экспериментальные (черные столбцы) и расчетные (светло-серые столбцы) данные по максимальному значению тока в индукторе  $i_{1max}$  (рис. 7а) и максимальной скорости нарастания тока в цепи индуктора (рис. 7б)

$$dvi_{1max} = (di_1/dt)_{max} \approx i_{1max}/t_{фр}.$$

Заметим, чем больше указанные параметры, тем ниже надежность УЭПИ, поскольку требуется более сложное и дорогостоящее электронное оборудование

для системы возбуждения преобразователя. С этой точки зрения наиболее предпочтителен индуктор №3, а менее предпочтителен – индуктор №4.

Поскольку экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с расчетными, это позволяет включить в перечень анализируемых параметров рассчитанные величины силы  $f_{rez}$  и максимального импульса силы  $FI_{max}$ , действующих на якорь (рис. 8). При этом экспериментально показано, что измеренная величина виброускорения  $a_f$  прямо пропорциональна величине силы  $f_{rez}$ , а измеренная величина виброскорости  $v_f$  – величине импульса силы  $FI_{max}$ . Полученные из экспериментов величина  $f_{rez}$  и импульс силы  $FI_{max}$  соотносятся с соответственными расчетными показателями с точностью 4...19 %.

Как следует из рис. 8, несмотря на одинаковую энергию емкостного накопителя, в зависимости от применяемого индуктора проявляются существенные различия в характере силы  $f_{rez}$ , действующей на якорь, и величине импульса силы  $FI_{max}$ . С точки зрения обеспечения максимальной величины импульса силы также наиболее предпочтителен индуктор №3, а менее предпочтителен – индуктор №4.

Проанализируем взаимосвязь между геометрическими параметрами и силой воздействия на якорь на примере индукторов №1 и №2. Последний фактически состоит из двух близкорасположенных и соединенных электрически последовательно и согласно по магнитному полю индукторов №1.

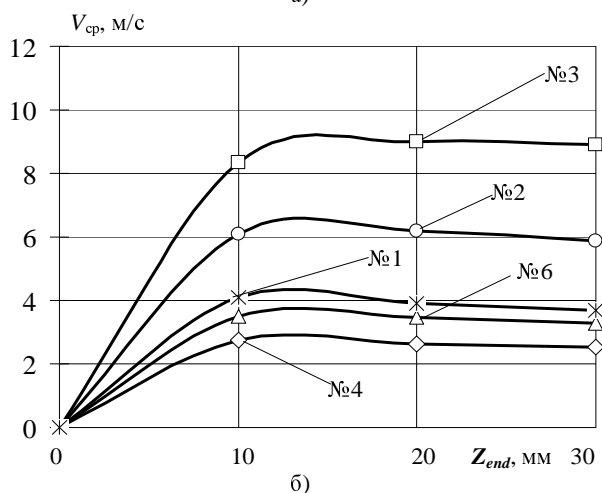
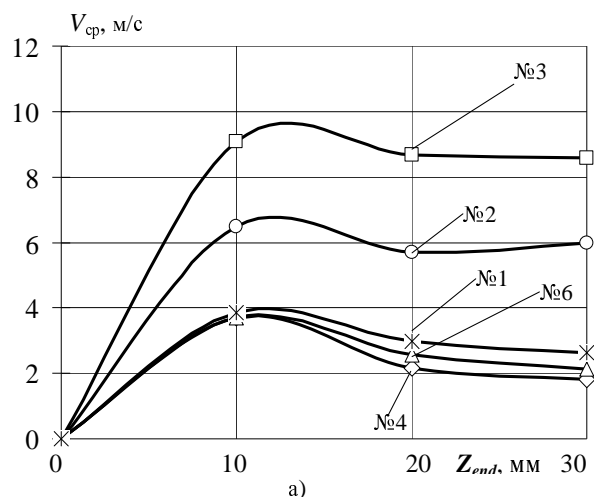


Рис. 6. Экспериментальные (а) и расчетные (б) средние скорости якоря для УЭПИ с различными индукторами

Индуктор №2 по сравнению с индуктором №1 характеризуется (табл. 1, рис. 8):

- увеличенными активным сопротивлением  $R_1$  и индуктивностью  $L_1$ , что снижает максимальное значение тока  $i_{1max}$ ;
- увеличенными длительностью фронта  $t_{фр}$  и полной длительностью импульса  $t_{имп}$ ;
- меньшей величиной силы  $f_{рез}$ , но более длительным ее воздействием;
- повышенной величиной импульса силы  $FI_{max}$ .

Аналогично изменяется характер воздействия индуктора на якорь и при сравнении индуктора №4 (11 витков, 1 ряд) и №6 (20 витков, 2 ряда). Таким образом, при увеличении числа витков путем добавления второго ряда обмотки в индукторе увеличивается импульс силы  $FI_{max}$ .

На базе сравнительного анализа однорядных индукторов №1 и №4, а также двухрядных индукторов №2 и №6 можно сделать вывод: увеличение числа витков индукторов и уменьшение их высоты до определенных величин позволяет повысить эффективность работы УЭПИ.

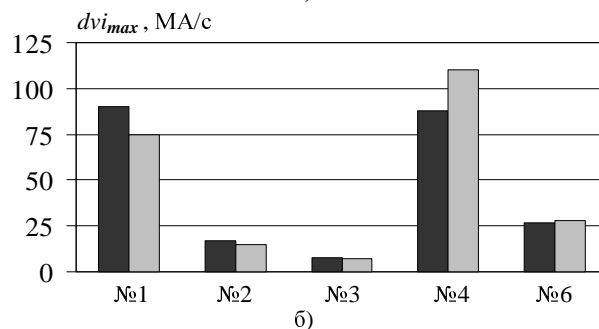
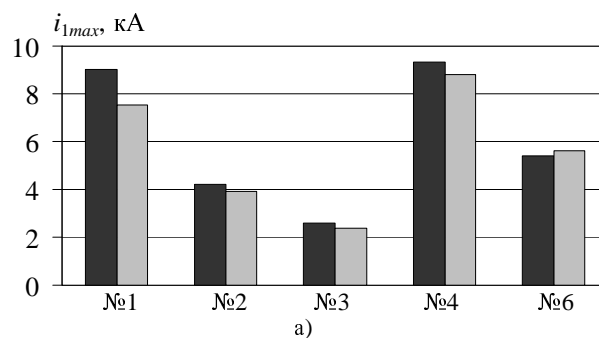


Рис. 7. Экспериментальные (черные столбцы) и расчетные (светло-серые столбцы) параметры УЭПИ с различными индукторами

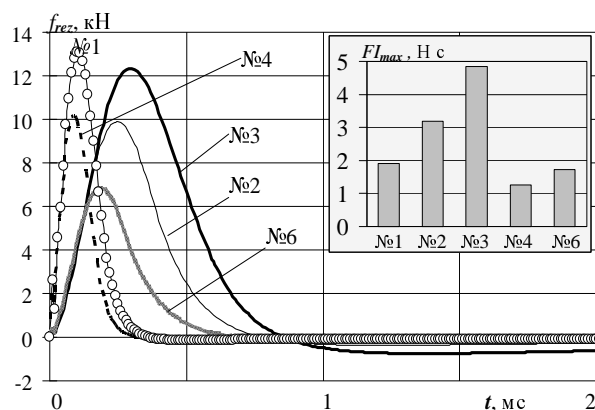


Рис. 8. Силы  $f_{рез}$  и импульсы силы  $FI_{max}$ , действующие на якорь УЭПИ с различными индукторами

### ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЕМКОСТНОГО НАКОПИТЕЛЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ УЭПИ

Очевидно, что с увеличением емкости  $C$  возрастает энергия источника, что приводит к увеличению импульса силы  $FI_{max}$  и скорости  $V_{cp}$  (рис. 9, 10). Однако указанный рост  $FI_{max}$  происходит по-разному для различных индукторов. Так, при увеличении емкости  $C$  от 1980 до 4830 мкФ величина  $FI_{max}$  увеличивается для индуктора №2 на 103%, а для индуктора №3 всего на 70%. Подобный характер изменения  $FI_{max}$  объясняется следующим: более эффективный индуктор №3 сообщает якорю большую скорость, нежели индуктор №2, что приводит к более быстрому выходу якоря из зоны сильного взаимодействия с индуктором. Поэтому при увеличении емкости накопителя в индукторе №3 добавленная энергия источника (за счет увеличения емкости) менее эффективно используется, чем и индукторе №2.

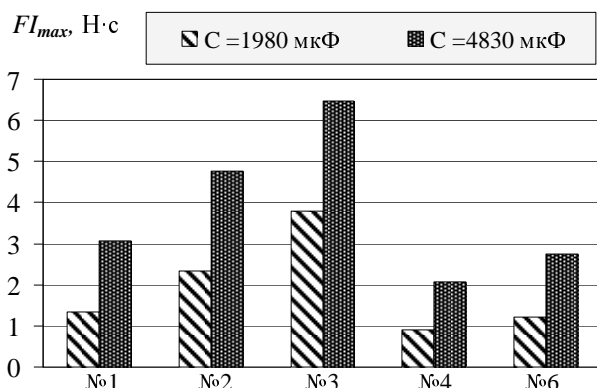


Рис. 9. Импульсы силы  $FI_{max}$  УЭПИ с различными индукторами

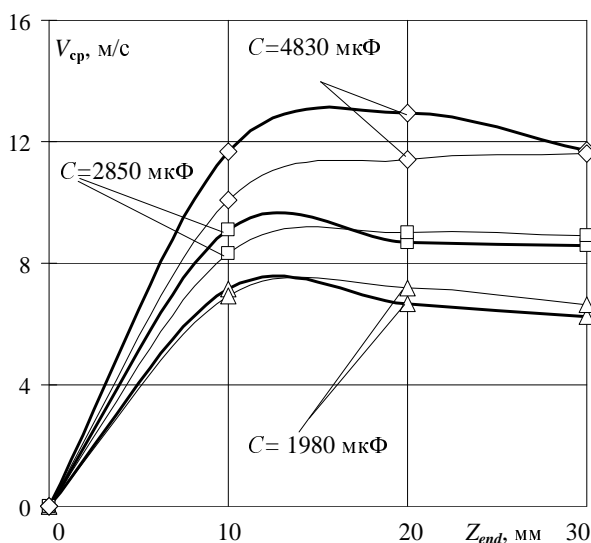


Рис. 10. Экспериментальные (жирные линии) и рассчитанные (тонкие линии) средние скорости якоря УЭПИ с индуктором №3

Сравним значение импульсов силы  $FI_{max}$ , сообщенных фиксированному (заторможенному) и свободному (движущемуся) якорю при разных емкостях  $C$  источника. Фиксированный якорь обладает неизменным и максимальным значением взаимоиндуктивности  $M_{12}$  с индуктором, поэтому импульс силы  $FI_{max}$  фиксированного якоря является максимальным для данного УЭПИ.

Свободный якорь приобретает меньший импульс силы  $FI_{max}$ , чем фиксированный, причем эта разница возрастает с увеличением емкости накопителя (рис.11). Это объясняется выходом ускоряемого якоря за пределы зоны с высокой магнитной связью с индуктором, в то время как фиксированный якорь имеет неизменную высокую магнитную связь. А с увеличением емкости накопителя скорость выхода свободно-го якоря из указанной зоны возрастает.

Увеличение емкости накопителя  $C$  практически одинаково увеличивает импульс силы любого фиксированного якоря с эффективным магнитным взаимодействием, в отличие от свободного якоря.

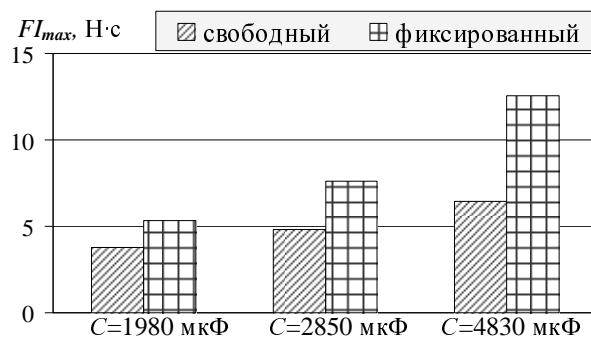


Рис. 11. Величины  $FI_{max}$  для свободного и фиксированного якоря УЭПИ при использовании индуктора №3

Полученный характер изменения импульса силы  $FI_{max}$  указывает на возможность разработки систем форсирования УЭПИ путем удержания якоря вблизи индуктора в первые моменты электромагнитного импульса.

### ИССЛЕДОВАНИЕ УЭПИ С ИНДУКТОРОМ В ФЕРРОМАГНИТНОМ КОРПУСЕ

Ферромагнитный (стальной) корпус индуктора (№5) по сравнению с немагнитным (№3) влияет на показатели УЭПИ, а именно:

- является элементом магнитопровода, снижая поля рассеяния и концентрируя их в активной зоне;
- обладает улучшенным теплоотводом;
- более технологичный;
- увеличивает индуктивность индуктора;
- увеличивает потери;
- более массивный;
- требует электрической изоляции.

Часть из этих показателей (первые три) позитивна, а часть (последние три) негативна.

На рис. 12 представлены экспериментальные значения средних скоростей якоря, полученные при использовании индукторов №3 и №5 при возбуждении от емкостного накопителя с напряжением  $U_0 = 400$  В и емкостью  $C = 6600$  мкФ.

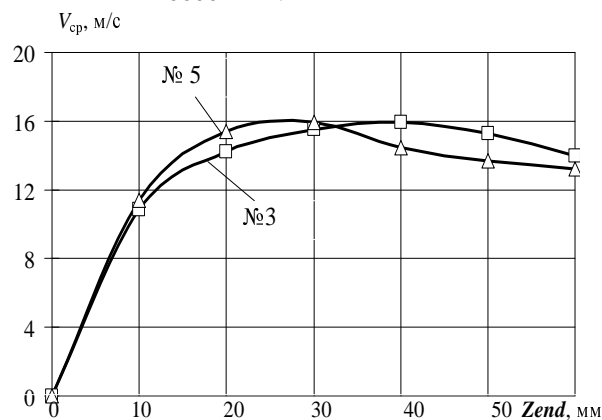


Рис. 12. Экспериментальные скорости якоря УЭПИ с индукторами №5 (стальной корпус) и №3 (стеклотекстолитовый корпус)

Как показали эксперименты в пределах точности измерений скорость якоря практически мало зависит от материала индуктора. Это можно объяснить тем, что влияние на эффективность УЭПИ ферромагнитного корпуса, по сравнению с немагнитным, приводит к появлению как позитивных факторов, например, концентрации магнитных полей в активной зоне и увеличению индуктивности, так и негативных факторов, например, увеличении потерь, что в целом компенсируется.

#### ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ИНДУКТОРАХ УЭПИ

Тепловые процессы в индукторе УЭПИ, особенно при циклическом режиме работы, приобретают важное значение, поскольку существенно влияют на механические свойства (размягчение и ослабление связующего материала), стойкость изоляции, а значит и надежность, изменение активного сопротивления, и как следствие, величину тока и силовые показатели. Поэтому одним из этапов экспериментального исследования индуктора УЭПИ является измерение температуры обмотки при циклическом нагружении импульсным током. Измерение температуры проводилось на середине рабочей (обращенной к якору) торцевой стороне обмотки индуктора при помощи термопары прибора М890G. При этом термопара контактировала с изоляцией шины индуктора, для чего в месте измерения предварительно снимался слой связующего эпоксидного материала (рис. 13).

В процессе измерений на исследуемые индукторы с частотой 0,7 Гц разряжались батареи конденсаторов с напряжением  $U_0 = 400$  В и емкостью в  $C = 1980$  мкФ. Динамика изменения температуры исследуемых индукторов показана на рис. 14.



Рис. 13. Измерение температуры обмотки индуктора термопарой

В процессе испытаний температура обмотки со временем растет, наиболее сильно в индукторе №3, который содержит стеклотекстолитовый каркас и по многим силовым и электрическим показателям был наиболее эффективным. За время 4 мин этот индуктор практически с неизменной скоростью нагревался до

температуры 110°C, при которой эпоксидная смола сильно размягчалась. В то же время температура индукторов №4 и №6 при этих испытаниях была наименьшей (до 40°C) и практически выходила на насыщение. Это свидетельствует о том, что между мощностью тепловыделений и теплоотводом с поверхности у этих индукторов устанавливалось динамическое равновесие.

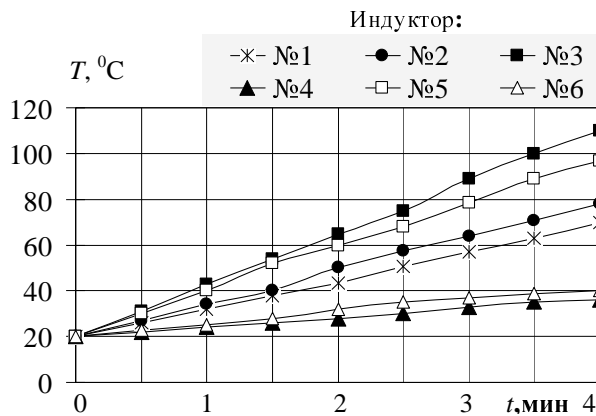


Рис. 14. Динамика изменения измеренной температуры обмотки индукторов

Можно также отметить позитивное влияние стального корпуса (индуктор №5) по сравнению со стеклотекстолитовым (индуктор №3). Обмотка индуктора №5 за 4 мин нагревается на 13°C меньше и при необходимости для нее можно организовать эффективный теплосъем, например при помощи воды, с наружной поверхности.

Таким образом, однозначно судить о преимуществах конкретного индуктора затруднительно, поскольку его эффективность можно оценивать с различных сторон.

#### ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНДУКТОРОВ

Для оценки преимуществ того или иного вида индукторов будем оперировать нормированными показателями: импульса силы  $FI_{\max}^*$ , максимального тока возбуждения  $i_{l\max}^*$ , максимальной скорости нарастания тока  $dvi_{\max}^*$ , суммарной массы  $m_{ind}^*$  и превышения температуры к концу измерения  $\theta_{fin}^*$  ( $\theta = T_{fin} - T_0$ ), где  $T_{fin}$  – конечная температура индуктора;  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  – температура окружающей среды. В качестве базы для нормирования выберем показатели индуктора №3.

Зададимся обобщающим критерием эффективности индуктора  $K_{ind}$

$$K_{ind} = \beta_1 \cdot FI_{\max}^* + \frac{\beta_2}{i_{l\max}^*} + \frac{\beta_3}{dvi_{\max}^*} + \frac{\beta_4}{\theta^*} + \frac{\beta_5}{m_{ind}^*}, \quad (5)$$

где  $\beta_j$  – весовой коэффициент соответствующего показателя.

При этом

$$\sum_{k=1}^4 \beta_k = 1. \quad (6)$$

Обобщающий критерий обуславливает максимальную величину импульса силы и минимальные значения остальных показателей. При этом составляющие обобщающего критерия учитываются в соот-

ветствии с весовыми коэффициентами  $\beta_1 = 0,5$ ,  $\beta_2 = 0,18$ ,  $\beta_3 = 0,15$ ,  $\beta_4 = 0,12$ ,  $\beta_5 = 0,05$ . Показатели УЭПИ с разными индукторами представлены в табл. 2.

Таблица 2

Критерии эффективности индукторов

№	Нормированные критерии эффективности					
	$FI_{\max}^*$	$i_{l\max}$	$dvi^*$	$\theta^*$	$m_{ind}^*$	$K_{ind}^*$
1	0,35	3,13	13,06	0,56	0,44	<b>0,572</b>
2	0,62	1,62	2,27	0,62	0,97	<b>0,732</b>
3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	<b>1,0</b>
4	0,24	3,65	20	0,18	0,99	<b>0,894</b>
5	1,00	1,00	1,00	0,85	2,24	<b>0,993</b>
6	0,32	2,27	3,52	0,22	1,75	<b>0,856</b>

Наибольшую величину импульса силы и наименьшие токовые показатели обеспечивают индукторы №3 и №5, что относится к их достоинствам. Однако у индуктора №3 наибольшая температура нагрева, что особенно проявляется при циклическом режиме работы, а у индуктора №5 наибольшая масса, что важно для компактных автономных УЭПИ.

Но несмотря на это, максимальными значениями обобщенного критерия  $K_{ind}^*$  характеризуются индукторы №3 и №5, а худшими являются индукторы №1 и №2, не имеющие специального корпуса. Наличие корпуса у индукторов №3 и №5 делает достаточно их конструктивными и технологичными элементами УЭПИ, повышая его надежность и функциональные возможности.

Таким образом, для исследуемого УЭПИ рекомендуется индуктор плотно наматывать медной шиной сечением  $1,8 \times 4,8 \text{ мм}^2$  в два ряда, помещать в изоляционный или стальной каркас и полностью компандировать эпоксидным клеем.

### ВЫВОДЫ

1. Исследованы шесть индукторов ударного электро-механического преобразователя индукционного типа, имеющие различные геометрические размеры, число витков и сечение провода, степень пропитки и плотность укладки, наличие или отсутствие каркаса.
2. Установлены закономерности влияния основных параметров индуктора на электрические, механические и тепловые показатели при различных режимах работы преобразователя.
3. На основе предложенных критериев выполнена оценка эффективности индукторов и предложены практические рекомендации по их конструктивно-му выполнению.
4. Наблюдается удовлетворительное соответствие между расчетными и измеренными параметрами, что позволяет в дальнейшем оперировать расчетной моделью для выбора параметров индуктора проектируемого электро-механического преобразователя.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тюткин В.А. Магнитно-импульсный способ разрушения сводов и очистки технологического оборудования от налипших материалов // Электротехника. - 2002. - № 11. - С. 24-28.
2. Татмышевский К.В., Козлов С.А. Магнитно-импульсные установки для испытаний изделий авиакосмической техники на ударные воздействия // Авиакосмическое приборостроение. - 2005. №12. - С. 52-57.
3. Батыгин Ю.В., Бондаренко А.Ю., Чаплыгин Е.А. Электродинамические процессы в цилиндрической индукционной индукторной системе для магнитно-импульсного притяжения листовых заготовок // Авиационно - космическая техника и технология. - 2007. - №11 (47). - С. 109 - 117
4. А.Г.Гурин, Б.Г.Набока, В.Я.Гладченко, "Волновые явления в электродинамических излучателях и формирование сложных гидроакустических сигналов", *Техн. электродинамика*, № 2, сс. 3-6, 2001.
5. A.Balikci, Z.Zabar, L.Birenbaum et al., "Improved performance of linear induction launchers", *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 41, № 1, pp. 171-175, 2005.
6. Болюх В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. Теоретические и экспериментальные исследования индукционно-динамического двигателя, возбуждаемого от полярного емкостного накопителя // Техн. электродинамика. Тем. выпуск: Проблемы сучасної електротехніки. - 2006. - Ч. 2. - С. 65-70.
7. Болюх В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. Синтез параметров высокоэффективного электро-механического преобразователя ударного действия // Техн. электродинамика. Тем. выпуск: Проблемы сучасної електротехніки. - 2008. - Ч. 2. - С. 63-68.

Поступила 26.08.2009

Болюх Владимир Федорович, д.т.н., проф.,  
Рассоха Максим Алексеевич, аспирант  
Национальный технический университет "ХПИ",  
кафедра общей электротехники  
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,  
тел. (057) 70-76-427,  
e-mail: bolukh@kpi.kharkov.ua

Марков Александр Михайлович, ст. науч. сотр.  
Лучук Владимир Феодосьевич, к.т.н., ст. науч. сотр.  
Щукин Игорь Сергеевич, к.т.н., доц.  
ООО Фирма "ТЭТРА, Ltd",  
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,  
e-mail: tech@tetra.kharkiv.com.